



**Universidad
Andrés Bello®**

Universidad Andrés Bello
Facultad de Ingeniería
Ingeniería en Construcción

**GENERACIÓN DE CALOR UTILIZANDO MORTERO CONDUCTOR DE
ELECTRICIDAD PARA DETERMINAR SU POTENCIAL COMO ELEMENTO DE
CALEFACCIÓN EN VIVIENDAS**

Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor.

Autor:

Juan Ignacio Añazco Quintana

Profesor Guía: Mauricio Toledo Villegas

Santiago de Chile, Chile

2017

Resumen: En Chile existe una dependencia de artefactos de calefacción a base de combustibles fósiles o leña, por ser las fuentes más económicas de generación de energía, siendo un factor incidente en la calidad de vida de las personas al producir contaminación intradomiciliaria y en consecuencia, ser un factor que aumenta la posibilidad de enfermar en épocas de mayor frío ambiental. El uso de elementos eléctricos es restringido a algunos niveles socioeconómicos, por el alto costo de operación de los mismos. En nuestra investigación, aplicando el concepto de calentamiento por Efecto Joule sobre mortero conductor, verificamos que tiene un potencial para ser implementado como método de calefacción en viviendas al someter a pruebas de generación de calor probetas elaboradas con dicho mortero, y además determinar una dosificación de fibras de carbono como agregado conductor.

Abstract: In Chile there is a dependence on heating appliances based on fossil fuels or wood to be the most economical sources of power generation, being an incident factor in the quality of life of people to produce indoor air pollution and thus be a factor It increases the chance of getting sick in times of increased environmental cold. The use of electrical elements is restricted to some socioeconomic levels because of the high cost of operating them. In our research, applying the concept of Joule heating of conductive mortar, verify that can be an alternative heating homes to be tested for generation of specimens heat obtained from said mortar, and further determining a dosage of an aggregate conductor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Mónica y Juan por su infinita paciencia en lo que ha sido el camino que he seguido durante mi formación. Por el incondicional apoyo que me entregaron en cada una de mis decisiones y principalmente, por no dejar de creer en mí. A mi hermana y abuelos por su apoyo.

A cada uno de mis profesores que han sido parte de mi vida durante mi formación. Por entregarme sus conocimientos y fundar mis bases como profesional.

A mi profesor guía, Mauricio Toledo, por la orientación en el desarrollo de mi investigación.

A mis amigos, por ser mi conexión a tierra en las situaciones propias del vivir.

«La distancia, que es el impedimento principal del progreso de la humanidad, será completamente superada, en palabra y acción. La humanidad estará unida, las guerras serán imposibles y la paz reinará en todo el planeta»

Nikola Tesla

Tata, lo hice.

Índice de contenido

1	Introducción	7
1.1	Objetivos	9
1.2	Hipótesis	9
2	Metodología	10
2.1	Elaboración de probetas	12
2.1.1	Incorporación de fibras de carbono	12
2.2	Acondicionamiento de fibras de carbono	14
2.3	Incorporación de fibras de carbono y arena de cuarzo	14
2.4	Suministro de energía	16
2.5	Instrumentos de medición	17
2.6	Estimación de calor radiado	18
2.7	Ensayos a realizar	19
2.7.1	Comparación de temperatura alcanzada a una misma potencia eléctrica	19
2.7.2	Distribución del calor generado por la probeta a máxima potencia eléctrica	19
3	Resultados	20
3.1	Prueba de generación de calor a una misma potencia	21
3.2	Generación y distribución del calor	23
3.2.1	Probetas con 3% de adición de fibras de carbono	25
3.2.2	Probetas con 4% de adición de fibras de carbono	25
3.2.3	Probetas con 5% de adición de fibras de carbono	25
3.3	Potencia de radiación	26
4	Conclusiones	28
5	Futuros pasos para la investigación	29
6	Bibliografía	30
7	Anexos	32
7.1	Anexo A: Diagrama del circuito eléctrico de la fuente de alimentación	32
7.2	Anexo B: Especificaciones técnicas de equipos utilizados	33
7.2.1	Especificaciones técnicas termómetro infrarrojo	33
7.2.2	Especificaciones técnicas Multímetro UNI-T UT33C	34
7.2.3	Especificaciones técnicas cámara termográfica Juke serie TiR	35
7.3	Anexo C: Fotografías	38
7.3.1	Probetas con 3% de adición	38
7.3.2	Probetas con 4% de adición	39
7.3.3	Probetas con 5% de adición	40

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de metodología	10
Figura 2. Esquema del proceso experimental	11
Figura 3. Capa aislante producida por la lechada en los electrodos de cobre	13
Figura 4. Probetas y molde	13
Figura 5. Fibra cortada para ser utilizada en la mezcla de mortero.....	14
Figura 6. Fuente de alimentación	16
Figura 7. Montaje experimental	17
Figura 8. Gráfica de la temperatura durante el ensayo a 3W	22
Figura 9. Temperatura alcanzada durante 120 minutos de medición.....	23
Figura 10. Distribución del calor generado por las probetas	24
Figura 11. Gráfico Potencia Radiación	26
Figura 12. Diagrama del circuito de la fuente de alimentación	32
Figura 13. Ejemplo de probetas con 3% de FC.....	38
Figura 14. Ejemplo de probetas con 4% de FC.....	39
Figura 15. Ejemplo de probetas con 5% de FC.....	40

Índice de Tablas

Tabla 1. Penetración de sistemas de calefacción a nivel nacional y por NSE	8
Tabla 2. Porcentaje de fibras de carbono incorporadas y relación A/C.....	12
Tabla 3. Porcentaje de cuarzo en relación a masa de cemento.....	15
Tabla 4. Temperaturas de probetas con diferentes dosificaciones a 3,0w	21
Tabla 5. Potencia de radiación en probetas con 4% de FC	26

1 Introducción

En Chile, la necesidad de utilizar sistemas de calefacción para elevar la temperatura ambiental de las viviendas a rangos de confort sigue siendo una importante necesidad para gran parte de la población, pues si bien se han realizado mejoras en las normativas de aislación térmica descritas en la NCh 853, 2007; existe un 86% de viviendas construidas antes de la entrada en vigencia de la primera reglamentación térmica, de las cuales un 12% cuentan con la primera reglamentación térmica que contempla techumbres que fueron construidas entre los años 2001-2007. Un 2% fueron construidas después del año 2008 bajo la última reglamentación térmica que contempla muros, techos y pisos ventilados (CDT, 2010). La materialidad de las viviendas corresponde principalmente albañilería y madera/tabique, cuya proporción sumada representa un 75.3% del total nacional (CDT, 2010). En épocas donde las temperaturas ambientales bajan y la necesidad de utilizar elementos calefactores para conseguir confort térmico en viviendas, principalmente en invierno o durante todo el año en zonas extremas, los sistemas empleados en su mayoría son el gas licuado, kerosene y leña. Desde el punto de vista de la salud de las personas, kerosene y el gas licuado son los que más consecuencias negativas tienen sobre los habitantes de la zona sur. Estos sistemas son de llama expuesta ya que la combustión se realiza en el calefactor y los productos resultantes de la misma quedan en el ambiente y producen contaminación intradomiciliaria que, según el Servicio de Salud Metropolitano Norte (MINSAL, 2013), junto con otros factores como la humedad que se ve incrementada como resultado de la combustión, tienen una asociación directa con el aumento de las enfermedades respiratorias agudas frecuentes en invierno. La principal razón de la preferencia por el uso de los sistemas mencionados es que son más económicos que un sistema eléctrico, lo que explica su alta preferencia en todos los niveles socio-económicos. Como se observa en la Tabla 1, se confirma la baja preferencia por las alternativas de funcionamiento eléctrico en todos los niveles socio-económicos, siendo los niveles C3 y D los que menos empleo de calefacción eléctrica tienen.

Tabla 1. Penetración de sistemas de calefacción a nivel nacional y por Nivel Socioeconómico. Elaboración propia en base a datos CDT (2010)

	NACIONAL	ABC1	C2	C3	D
CALEFACTOR A GAS LICUADO EN BALONES A NIVEL NACIONAL Y NSE					
SI	34,4%	52,3%	46,6%	28,1%	29,6%
NO	65,6%	47,7%	53,4%	71,9%	70,4%
CALEFACTOR A PARAFINA A NIVEL NACIONAL Y NSE					
SI	20,5%	25,6%	16,6%	22,5%	19,8%
NO	79,5%	74,4%	83,4%	77,5%	80,2%
CALEFACTOR A LEÑA A NIVEL NACIONAL Y NSE					
SI	31,0%	21,3%	18,8%	32,6%	36,6%
NO	69,0%	78,7%	81,2%	67,4%	63,4%
CALEFACTOR ELÉCTRICO A NIVEL NACIONAL Y NSE					
SI	11,7%	26,8%	23,4%	7,6%	6,5%
NO	88,3%	73,2%	76,6%	92,4%	93,5%

El problema antes planteado se ve intensificado en épocas de bajas temperaturas y tiene efecto en la salud de las personas, principalmente en los quintiles más bajos por la participación del consumo en energía en el presupuesto familiar (Márquez, Miranda y Aserta Consultores, 2007).

En la necesidad de innovar con motivo de los nuevos requerimientos que van surgiendo, brindar diferentes propiedades a materiales que se utilizan para la construcción de modo de optimizar su uso y mejorar su vida útil. Por ello se han realizado estudios en mezclas cementicias con adiciones que le brinden una nueva propiedad: conducción y resistencia eléctrica.

Los morteros u hormigones son materiales dieléctricos (Romero, 2007), es decir, no son buenos conductores de electricidad y solamente se ha determinado que son capaces de conducir electricidad cuando se encuentran en estado fresco o contienen un alto porcentaje de humedad.

Es posible mediante la adición de materiales conductores en la mezcla, otorgar la propiedad de conducir la electricidad y poder utilizarla mediante el Efecto Joule para generar calor y materiales con mejores propiedades térmicas para aumentar la retención de calor (Chung, 2000). Es bien conocida la primera ley de Joule, la que señala que cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor se genera calor (Athanasopoulos, y Kostopoulos, 2012). El calor es generado por la resistencia del conductor al paso de los electrones. Bajo el mismo concepto se realizó la construcción de la carpeta de rodado en Nebraska, Estados Unidos con el objetivo de evitar la formación de hielo. Ese es un caso que ha demostrado la efectividad como elemento para el deshielo en pavimentos a costos de operación inferiores a otros existentes como la instalación de cañerías de agua caliente (Tuan, 2004).

Es así como surge la interrogante de si es posible utilizar ese concepto como elemento de calefacción en viviendas y ser una alternativa que permita acceder a la electricidad como mecanismo de calefacción a un costo inferior o semejante a otros existentes en la actualidad, de manera de tener una influencia positiva en el confort y salud de las personas.

1.1 Objetivos

General:

Determinar si es posible aplicar el concepto de calentamiento por Efecto Joule en una mezcla de mortero conductor de electricidad para ser aplicado como elemento de calefacción.

Específicos:

- Elaborar probetas de mortero conductor de electricidad para someterlas a ensayos.
- Obtener una dosificación funcional para la generación de calor.
- Determinar el requerimiento de potencia eléctrica.

1.2 Hipótesis

Mediante la adaptación del concepto de la generación de calor mediante el Efecto Joule, comprobar si es posible aplicarlo en una mezcla cementicia con una adición para que sea conductora de electricidad. Para el objetivo de emplear la mezcla como elemento calefactor hemos determinado una temperatura objetivo de 60 °C. Para ello obtendremos una dosificación de fibra de carbono que se aproxime de mejor manera (temperatura objetivo y el consumo energético requerido) a nuestro objetivo final.

2 Metodología

Para realizar la investigación se utilizaron fibras de carbono, por sus excelentes características de conducción de electricidad y por mantenerse inerte en la reacción del cemento con el agua con cualquier dosificación empleada para obtener un mortero conductor de electricidad. Se elaboraron probetas con diferentes dosificaciones de fibras de carbono en una cantidad correspondiente a un porcentaje respecto a la masa de cemento utilizado. Para la obtención de datos fueron realizados dos tipos de ensayos. Uno para obtener información respecto a la temperatura que alcanza la probeta durante un tiempo de 120 minutos. El segundo ensayo tiene como propósito obtener visualmente cómo se calentará la probeta, es decir, la distribución del calor utilizando una cámara termográfica y adquirir puntos de temperatura superficial, información que además será útil para realizar una estimación de la potencia de radiación de la probeta.

El orden con el que fue desarrollada la investigación está basado en el método CIFE Horseshoe que se presenta en la Figura 1. Los objetivos y por consiguiente la metodología utilizada fueron diseñadas en base a la pregunta de investigación y la contribución al conocimiento deseada.

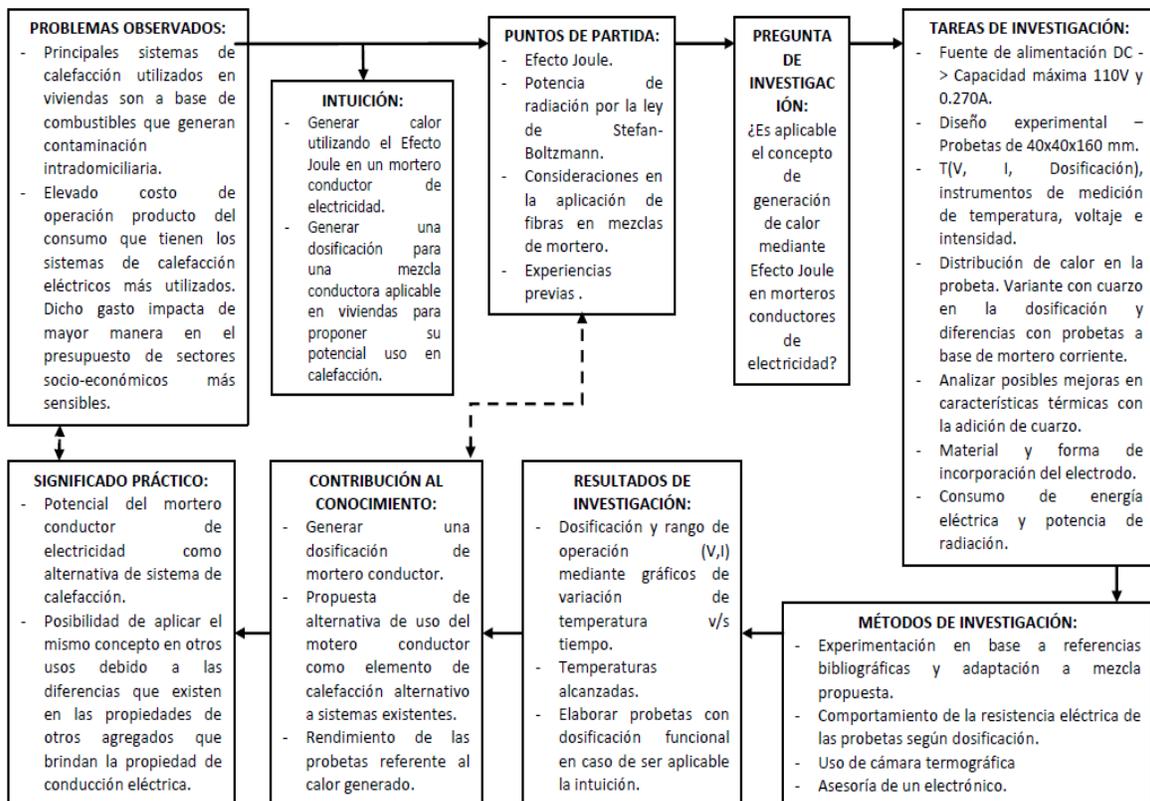


Figura 1. Esquema de metodología aplicando CIFE Horseshoe en la investigación (Fischer, 2006)

Se realizaron dos tipos de ensayo, el primero para determinar la temperatura que alcanzan las probetas sometiéndolas a una intensidad de corriente fija, registrando las temperaturas utilizando una termocupla instalada en el centro de las probetas y el tiempo transcurrido. La intensidad utilizada era común entre las que contenían el mismo porcentaje de fibras de carbono, de modo de poder obtener información sobre la energía requerida para alcanzar la temperatura objetivo en cada caso. La segunda prueba realizada consistió en someter las probetas al máximo que era capaz de entregar la fuente de alimentación para poder observar la distribución del calor generado.

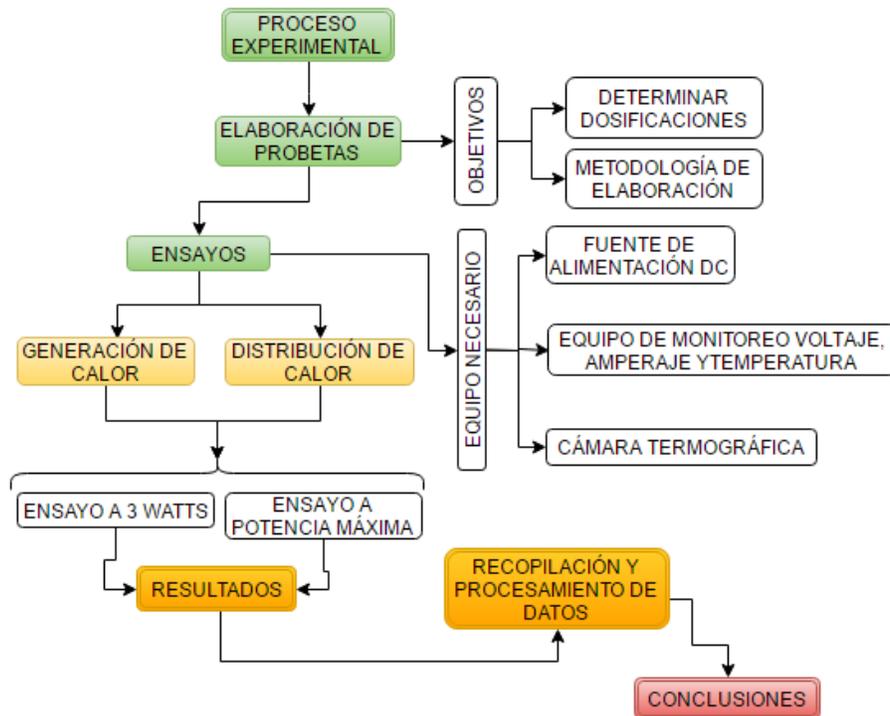


Figura 2. Esquema del proceso experimental diseñado para nuestra investigación

Para poder realizar las pruebas fue necesario acondicionar las fibras para facilitar su incorporación en la mezcla y ésta fuese apta para la elaboración de probetas. Además, fue necesario construir una fuente de alimentación para poder desarrollar la investigación. Para la recolección de datos utilizamos instrumentos apropiados que se especifican más adelante en el presente escrito. Finalmente, con la información obtenida se realizó el cálculo de potencia de radiación. Para complementar nuestra investigación, fueron realizadas pruebas con un porcentaje de cuarzo incorporado en la dosificación. La selección de cuarzo se debe a que no interfiere en las propiedades de conducción eléctrica, no reacciona con el cemento y tiene mejores propiedades de conducción térmica (Jobmann y Bunterbarth, 2009).

El esquema del proceso experimental se presenta en la Figura 2.

2.1 Elaboración de probetas

2.1.1 Incorporación de fibras de carbono

La dosificación que utilizamos para la preparación del mortero fue: 1 parte de cemento y 3 partes de arena, con una razón A/C 0.60 o A/C 0.65. Tomamos la decisión de utilizar diferente relación A/C para mantener una apropiada trabajabilidad, concepto utilizado para describir la facilidad para mezclarse, transportarse y manejarse en morteros y hormigones, que sea adecuada y perjudicar lo menos posible la dispersión de las fibras de carbono incorporadas. Definimos que la cantidad de fibras de carbono a incorporar en las dosificaciones de mortero serían en relación a la masa de cemento utilizado. Por cada dosificación elaboramos tres probetas utilizando arena y moldes estandarizados según la NCh158-1967 con dimensiones de 40x40x160 milímetros. El total de probetas que elaboramos se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de fibras de carbono incorporadas con respecto a la masa de cemento y relación A/C. Total de probetas elaboradas: 18

% Fibras de carbono	Número de probetas elaboradas	Relación A/C empleada
0	3	0.60
1	3	0.60
2	3	0.65
3	3	0.65
4	3	0.65
5	3	0.65

En un comienzo utilizamos electrodos de cobre colocados en el molde antes de añadir el mortero, pero luego de realizar varias pruebas lo descartamos debido a la formación de una capa aislante en la superficie del cobre producida por la lechada originada por exudación, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Capa aislante producida por la lechada en los electrodos de cobre

Por lo anterior utilizamos cordón de fibras de carbono como electrodos que no presentaban el problema antes descrito. Las probetas finales son las que se presentan en la Figura 4, fotografía tomada al momento de retirar del molde un set de muestras.

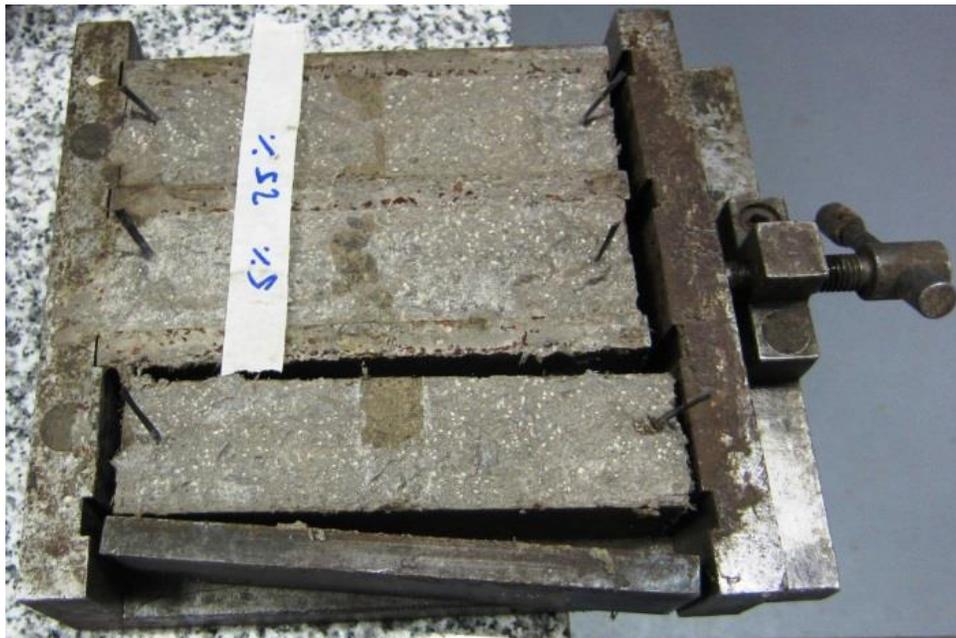


Figura 4. Probetas y molde. Se aprecia el detalle de las zonas de inserción de los electrodos que son del mismo cordón de fibras de carbono que utilizamos en el desarrollo de toda la investigación. El molde es el señalado en la NCh158.of67

2.2 Acondicionamiento de fibras de carbono

Para las fibras de carbono, consideramos utilizar un largo de 5 mm aproximadamente, pues para efectos de nuestra investigación la prioridad era estudiar la conducción eléctrica por sobre las mejoras de propiedades mecánicas, por lo que estas últimas no fueron determinadas. En general, a menores diámetros de fibras, se vuelve más difícil obtener una buena dispersión de las fibras de carbono, mientras que a menores largos se obtienen mejores dispersiones (Chung, 2005). La fibra utilizada viene en presentación de un cable continuo compuesto de múltiples fibras de carbono que usualmente tienen diámetros cercanos a los 10 μm (Chung, 2005). Optamos por dividir el cordón en secciones más pequeñas y después cortarla. La presentación original del cordón y después de haberla cortado se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Fibra cortada para ser utilizada en la mezcla de mortero

2.3 Incorporación de fibras de carbono y arena de cuarzo

La adición de arena de cuarzo la realizamos reemplazando un porcentaje de la arena para elaborar el mortero corriente. Para efectos de nuestra investigación, consideramos reemplazar un 25% de la masa de arena por arena de cuarzo. La idea de agregar arena de cuarzo es estudiar los potenciales efectos que podría tener en nuestra investigación mejorando la conducción térmica del mortero. La Tabla 3 indica las probetas elaboradas, siendo igualmente tres por cada dosificación de fibras de carbono.

Tabla 3. Porcentaje de cuarzo en relación a masa de cemento para dosificación de fibras de carbono y número elaborado. El porcentaje de fibras de carbono es respecto a la masa de cemento utilizada. Total de probetas elaboradas de mortero con adición de cuarzo: 18

% Fibras de carbono	% Arena de cuarzo	Número de probetas elaboradas	Razón A/C
0	25	3	0.65
1	25	3	0.65
2	25	3	0.65
3	25	3	0.65
4	25	3	0.65
5	25	3	0.65

Retiramos las probetas del molde a los tres días y se conservaron en las condiciones ambientales del laboratorio por otros siete días. Al octavo día utilizamos un horno a 85°C por un tiempo de seis horas con el objetivo de eliminar la humedad interna de las probetas. Finalizadas las seis horas las dejamos en condiciones ambientales para ser ensayadas al día siguiente. En el Anexo C se encuentran fotografías de probetas terminadas y que ya han sido ensayadas.

2.4 Suministro de energía

Suministramos corriente continua (DC) utilizando una fuente de poder regulable en voltaje e intensidad, la que se muestra en la Figura 6, siendo capaz de proporcionar un máximo de 110V y 0.270A.

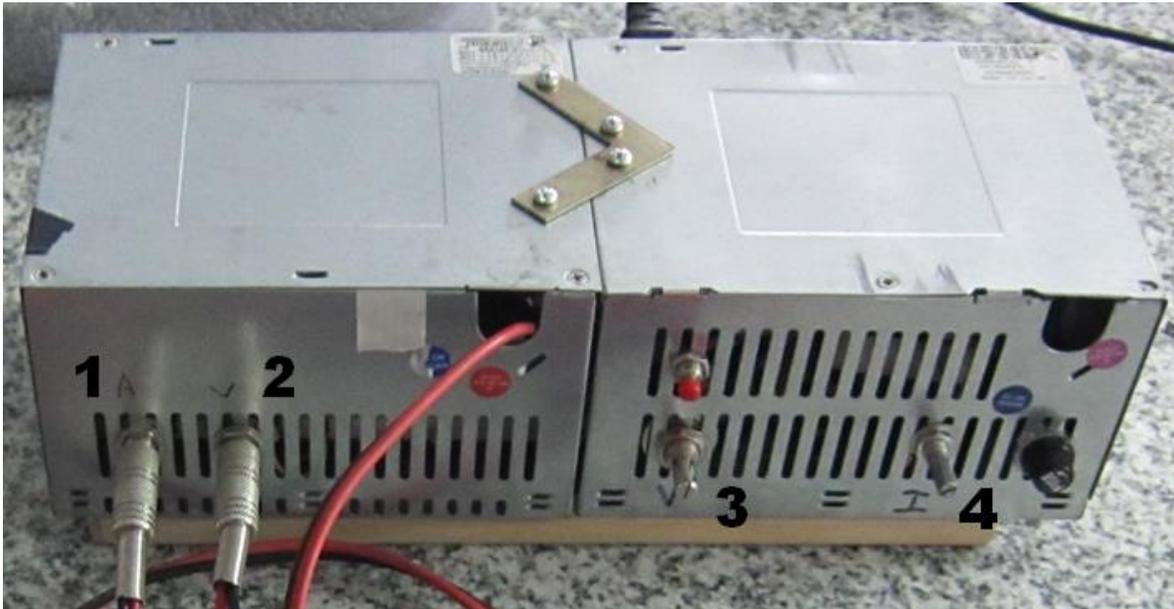


Figura 3. Fuente de alimentación: 1) Conector medición intensidad, 2) Conector medición voltaje, 3) Regulación de voltaje y 4) Regulación de intensidad

El diagrama eléctrico de la fuente de alimentación se encuentra en el Anexo A del presente escrito, pues fue diseñada y construida para la investigación.

2.5 Instrumentos de medición

Para la medición del voltaje e intensidad se usaron multímetros UNI-UT modelo UT33C que cuentan con la posibilidad de conectarle una termocupla. La temperatura superficial fue medida utilizando una cámara termográfica FLUKE modelo TiR con apoyo de un termómetro infrarrojo en ausencia de la cámara termográfica. En la Figura 7 se presentan los instrumentos durante un ensayo.

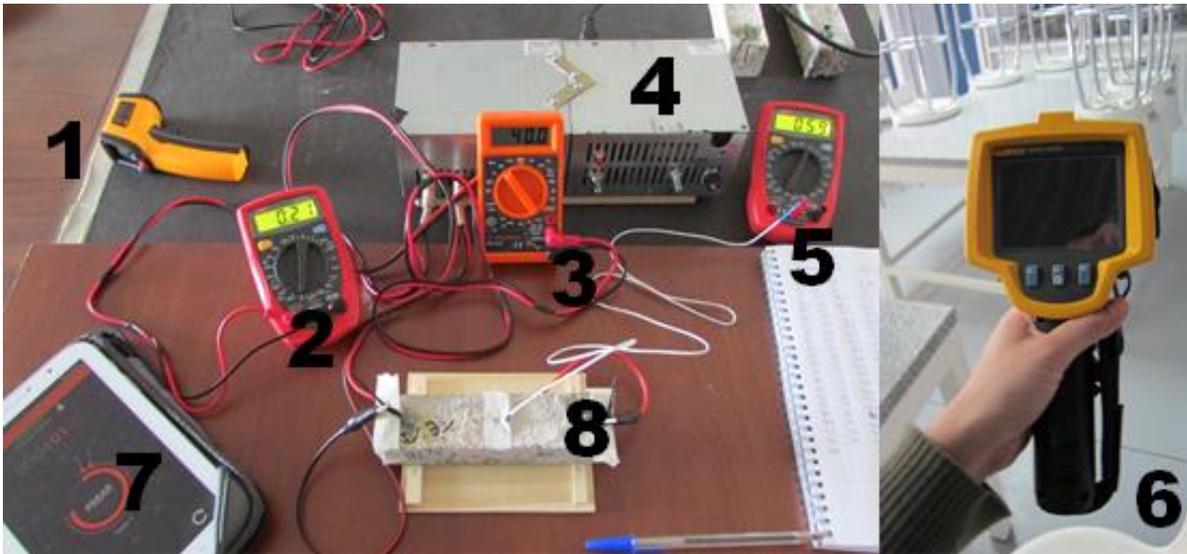


Figura 4. Montaje experimental. 1) Termómetro infrarrojo, 2) Multímetro para intensidad, 3) Multímetro para voltaje, 4) Fuente de alimentación, 5) Multímetro con termocupla, 6) Cámara termográfica, 7) Temporizador y 8) Probeta durante el ensayo

Las especificaciones técnicas de los aparatos utilizados se encuentran en el Anexo B del presente texto.

2.6 Estimación de calor radiado

Mediante la Ley de Stefan-Boltzmann realizamos una estimación de la potencia de radiación. Para ello las probetas fueron alimentadas con el máximo voltaje e intensidad que nos permitió la fuente de poder y esperamos 60 minutos antes de realizar cualquier tipo de medición con el objetivo de estimar la potencia de radiación máxima y la potencia empleada. La temperatura superficial utilizada corresponde al promedio de múltiples mediciones realizadas con la cámara termográfica por toda la superficie de la probeta. La Ley de Stefan-Boltzmann plantea lo siguiente:

$$H = \epsilon \sigma A T^4 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

H = potencia de radiación (rapidez a la cual se libera energía) en Watts (W)

ϵ = emisividad del cuerpo, cuyo valor es 0.9 para morteros (NCh853, 2007)

σ = constante de Stefan-Boltzmann= $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

A = superficie expuesta del cuerpo (m^2)

T = temperatura absoluta del cuerpo (K)

Por lo tanto, utilizando la Ec. 1 podemos obtener el valor estimado de la potencia de radiación en (W/m^2).

2.7 Ensayos a realizar

2.7.1 Comparación de temperatura alcanzada a una misma potencia eléctrica

En este ensayo, establecimos una potencia eléctrica fija que empleamos en todas las probetas. Realizamos la medición de la temperatura alcanzada cada cinco minutos hasta completar 120 minutos de ensayo para cada probeta con el objetivo de comparar el comportamiento de cada una.

2.7.2 Distribución del calor generado por la probeta a máxima potencia eléctrica

Utilizando la cámara termográfica y suministrando la máxima potencia eléctrica posible para cada probeta. Mantuvimos estas condiciones por un tiempo de 60 minutos para que la probeta eleve su temperatura. Tomamos fotografías de la distribución resultante para realizar una comparación entre las probetas que elaboramos con mortero corriente y las que tenían cuarzo en su dosificación.

3 Resultados

Las probetas control, con 0% de adición de fibras de carbono, solamente mostraron conducción eléctrica en una etapa temprana del curado, cuando aún se encontraban frescas. La conducción eléctrica se debe a la presencia de iones en el agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas (Wang, Wen y Chung, 2004) y sales presentes en los materiales utilizados. Cuando la probeta alcanzaba la humedad de equilibrio con el ambiente, perdían la propiedad de conducción eléctrica.

En las probetas con porcentajes de fibras de carbono de un 1% y un 2% no conseguimos obtener conducción eléctrica en todas las probetas elaboradas. Confeccionamos tres probetas adicionales por dosificación para generar una muestra más grande y comprobar si ocurría lo mismo. Finalmente las descartamos para la investigación debido a que en las probetas con un 1%, solamente un 50% (3 probetas) del total presentaban la propiedad de conducción eléctrica, mientras que en las probetas con un 2% un 66% (4 probetas) adquirieron la propiedad. Por lo tanto, ante la probabilidad de que no se consiga conducción eléctrica con seguridad y para efectos del objetivo de nuestra investigación. Por lo tanto, las dosificaciones propuestas de 1% y 2% de adición de fibras de carbono fueron descartadas.

3.1 Prueba de generación de calor a una misma potencia

Para determinar la capacidad en la generación de calor de las probetas con diferentes dosificaciones, las sometimos todas a una potencia de aproximadamente 3,0 [W] por un tiempo de 90 minutos, registrando la temperatura cada cinco minutos. El resultado se muestra en la Tabla 4 y en la Figura 8 se muestra la gráfica de la información entregada en la Tabla 4 con el objetivo de lograr de forma visual una comparativa del comportamiento de cada dosificación utilizada para la elaboración de las probetas.

Tabla 4. Temperaturas de probetas con diferentes dosificaciones a 3,0w aproximados durante 90 minutos de ensayo

Tiempo (min)	Temperatura (°C)					
	5% c/ 25% 3,16w (15,8V-200mA)	5% 3,13w (17,9V-175mA)	4% c/ 25% 3,13w (24,1V-130mA)	4% 3,10w (33,3V-93mA)	3% c/ 25% 3,16w (90,3V-35mA)	3% 3,20w (32V-100mA)
0	19	19	19	17	19	19
5	22	23	22	21	22	21
10	25	25	24	23	25	24
15	27	27	26	26	27	25
20	29	28	27	27	28	27
25	31	29	28	29	29	29
30	32	30	29	30	30	29
35	32	31	30	31	31	30
40	33	31	31	32	32	30
45	34	32	31	32	32	31
50	34	32	32	33	33	31
55	35	33	33	34	33	32
60	35	33	33	34	33	32
65	35	33	33	35	34	32
70	36	33	33	35	34	32
75	36	33	33	35	34	32
80	36	34	34	35	34	32
85	36	34	34	36	35	33
90	36	34	34	36	35	33

En la Tabla 4, cada columna representa la mezcla utilizada para la elaboración de probetas, ya sea únicamente con incorporación de fibras de carbono (FC%) o las que incorporan fibras de carbono y cuarzo (FC% c/ cuarzo%). La combinación de voltaje y amperaje utilizados para proporcionar los watts deseados se indican dentro de las columnas. Las filas representan la temperatura alcanzada al tiempo que se indica en la primera columna. El comportamiento de las probetas ha sido graficado en la Figura 5.

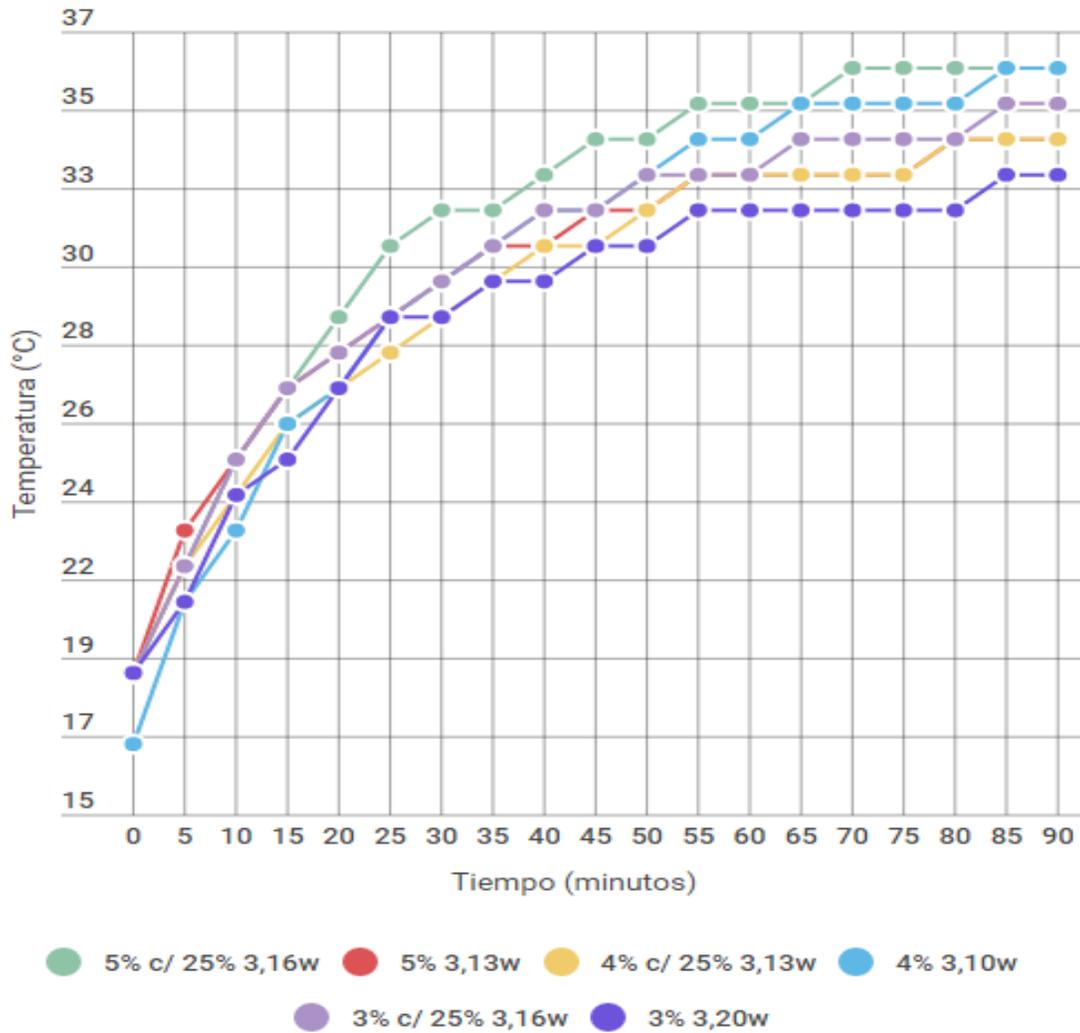


Figura 5. Gráfica de la temperatura durante el ensayo a 3W (c/ % indica el contenido de cuarzo)

El resultado obtenido es prácticamente el mismo al suministrar 3,0W a cada probeta. La temperatura final no difiere significativamente, así como el tiempo requerido para alcanzar el máximo registrado en general se encuentra dentro del mismo rango o no representa una diferencia relevante.

3.2 Generación y distribución del calor

Para las probetas únicamente con el 3% de adición de fibras de carbono la temperatura máxima alcanzada fue de 70°C a los 95 minutos de ensayo. Para las probetas con la misma dosificación de fibras de carbono, pero con la adición de cuarzo la temperatura máxima alcanzada fue de 74°C a los 85 minutos de ensayo. Las probetas únicamente con adición de 4% de fibras de carbono alcanzaron una temperatura de 64 °C a los 85 minutos. La variante con cuarzo alcanzó una temperatura de 48 °C a los 105 minutos de ensayo. Las probetas únicamente con adición de 5% de fibras de carbono alcanzaron una temperatura de 41 °C a los 90 minutos. La variante con cuarzo alcanzó una temperatura de 41 °C a los 75 minutos de ensayo. En la Figura 6 se presenta la gráfica de la evolución de la temperatura durante el tiempo de ensayo. Es importante señalar que los Watts aplicados a las probetas no es el mismo en cada dosificación, pues el objetivo era obtener la temperatura máxima era posible alcanzar y realizar una comparación que entregase un resultado que fuese visualmente distinguible al momento de realizar la gráfica correspondiente. Las potencias proporcionadas a las probetas fueron: 3% (90V): 70°C a los 95 minutos, 10.8W; 3% c/cuarzo (82V): 74°C a los 85 minutos, 9.84W; 4% (29V): 58°C a los 100 minutos. 6.09W; 4% c/cuarzo (27V): 51°C a los 105 minutos. 5,67W; 5% (30V): 45°C a los 90 minutos. 6.6W; 5% c/cuarzo (20V): 46°C a los 70 minutos. 4.4W.

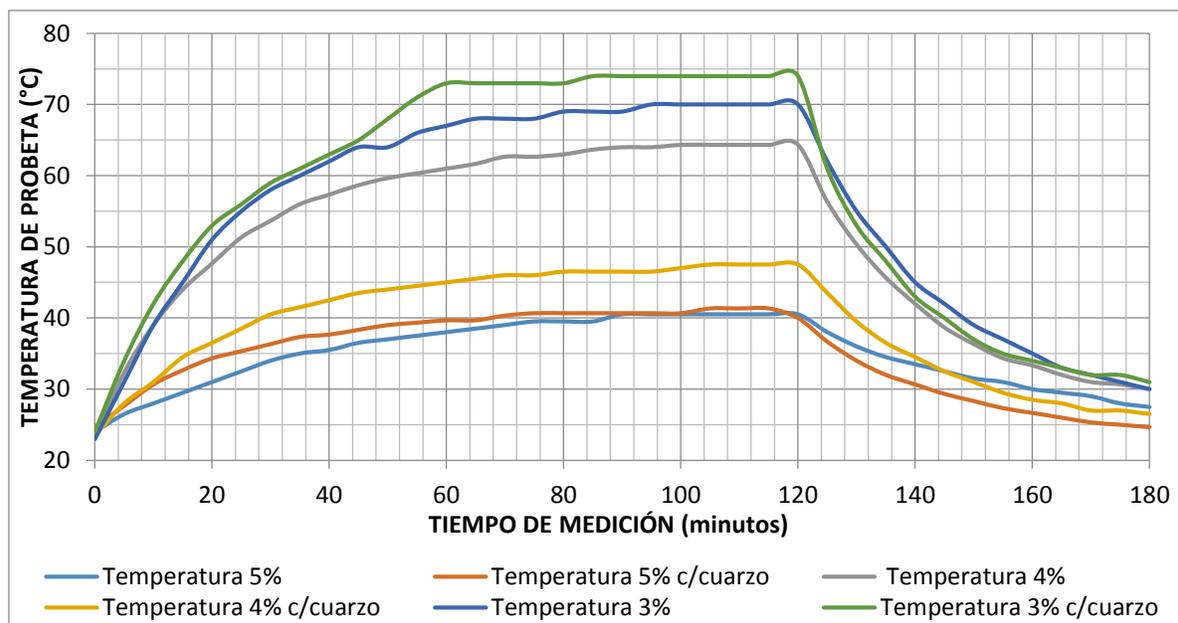


Figura 6. Temperatura alcanzada durante 120 minutos de medición

En definitiva, el comportamiento de las curvas es prácticamente el mismo para la dosificación de un 3% y 4%. La adición de un 25% de cuarzo reemplazando arena corriente fina en la dosificación no generó cambios significativos. Si bien la temperatura final que alcanzan las probetas se alcanza en un menor tiempo, también se enfrían más rápido al cortar el suministro eléctrico. Sin embargo, la probeta con 4% de fibras de carbono sale de la tendencia en la temperatura obtenida, pues son superiores a las de su homóloga con cuarzo, superiores a las con 5% de adición y similares a las probetas con 3% de adición de fibras de carbono.

Para cada dosificación se realizó el registro fotográfico (con la cámara termográfica) para el total de probetas confeccionadas por cada dosificación, tanto con y sin cuarzo. Una vez alcanzada la temperatura máxima, se observó la distribución del calor generado con la cámara termográfica. La Figura 10 muestra el resultado registrado por la cámara termográfica. Además, la Figura 10 está compuesta de varias imágenes (A, B, C, D, E y F), cuyo análisis se hará a continuación.

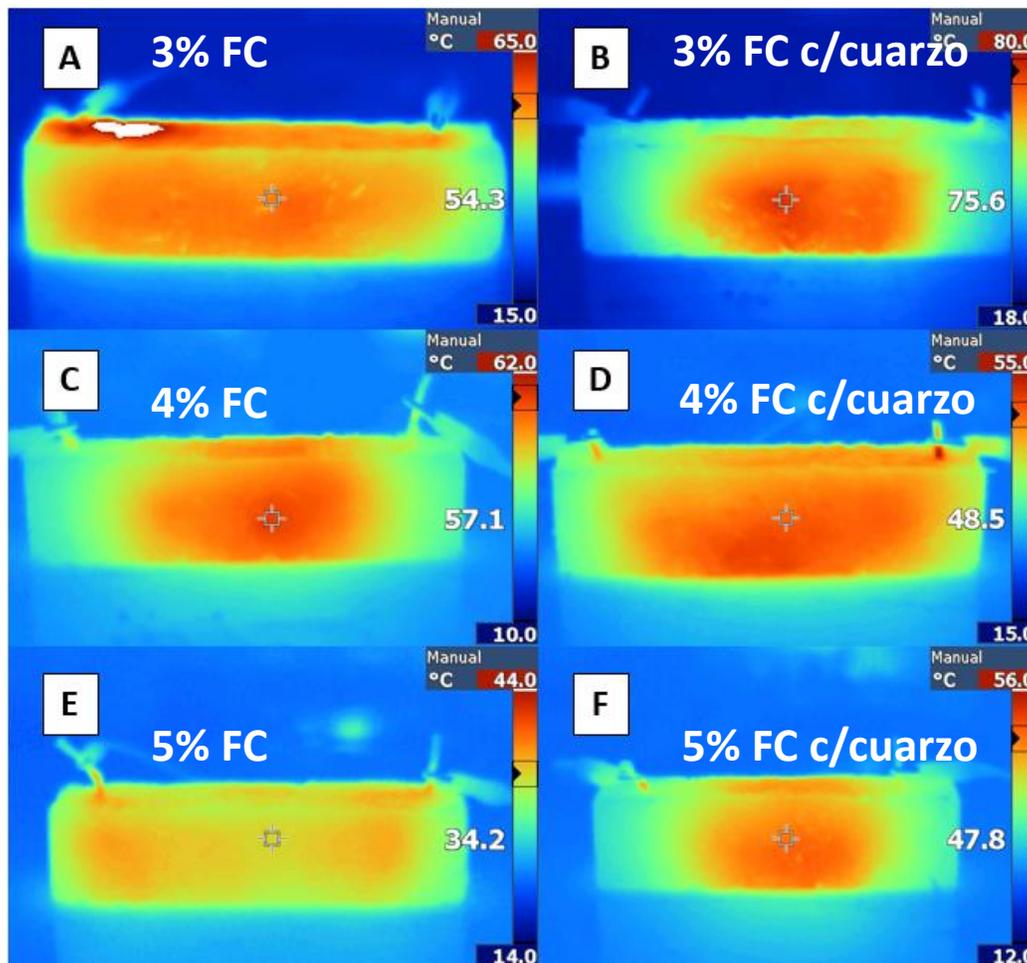


Figura 7. Distribución del calor generado por las probetas

3.2.1 Probetas con 3% de adición de fibras de carbono

En la Imagen A con una potencia de 13W (50V y 0.26A) la distribución resultante la elaborada con mortero corriente y en la Imagen B con una potencia de 13.96W (53.7V y 0.26A) la que contiene cuarzo

3.2.2 Probetas con 4% de adición de fibras de carbono

En la Imagen C con una potencia de 7.77W (29.9V y 0.26A) la distribución resultante la elaborada con mortero corriente y en la Imagen D con una potencia de 7.54W (29V y 0.26A) la que contiene cuarzo.

3.2.3 Probetas con 5% de adición de fibras de carbono

En la Imagen E con una potencia de 8.84W (34V y 0.26A) la distribución resultante la elaborada con mortero corriente y en la Imagen F con una potencia de 6.99W (25.9V y 0.27A) la que contiene cuarzo.

Las probetas muestran un comportamiento similar en el caso del 3% y 5% de adición de fibras de carbono. En ambos casos es mejor la distribución en el mortero corriente y en la variante con cuarzo se presenta una concentración de calor en el centro, sin embargo, para el 4% de adición el comportamiento se invierte, siendo más homogénea la distribución con la adición de cuarzo.

3.3 Potencia de radiación

La temperatura promedio está expresada en °C y la potencia de radiación en Watts (W) promedio de las probetas con 4% de adición de fibras de carbono sin cuarzo a diferentes intensidades. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 5. El área considerada para los cálculos corresponde a 0.0224 m², correspondiente a las dos caras de 40x40 mm. y tres caras de 160x40 mm.

Tabla 5. Potencia de radiación obtenida en probetas con 4% de adición de fibras de carbono a diferentes intensidades

Intensidad (A)	Temperatura (°C)	Potencia Radiación	
		(W)	Estimación para 1 m ² (W/m ²)
0.100	34	10.15	453.29
0.125	42	11.25	502.42
0.150	45	11.69	521.84
0.175	49	12.29	548.59
0.200	51	12.60	562.35
0.225	63	14.57	650.40
0.250	66	15.10	673.94

Graficamos los resultados para determinar qué tipo de relación existe entre la intensidad suministrada y la potencia de radiación, la Figura 11 corresponde la curva de Potencia de Radiación v/s Intensidad. Por la limitación en la capacidad de la fuente de alimentación no se realizaron pruebas a mayor potencia eléctrica. La estimación para 1 m² fue calculada en base a la superficie de las probetas y multiplicando por el número de veces necesario para que la superficie de las probetas llegue a 1 m².

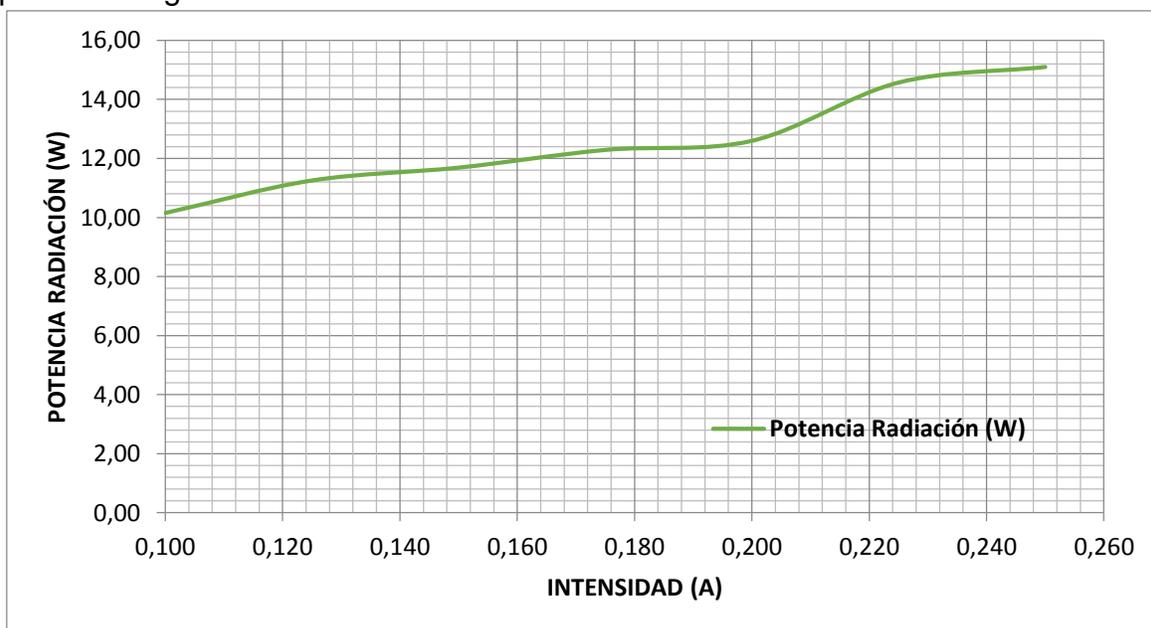


Figura 8. Gráfico Potencia Radiación (W) v/s Intensidad (A) probetas 4% sin cuarzo

Como era de esperar, existe una relación directa entre la intensidad que se suministró a las probetas y la potencia de radiación que generaron, por ende las temperaturas que son capaces de alcanzar.

4 Conclusiones

Pudimos comprobar que es posible alcanzar las temperaturas objetivo que determinamos son las adecuadas para implementarlas en una vivienda. El requerimiento energético en todos los casos fue bajo, pues nunca se superaron los 14 Watts y se obtuvieron las temperaturas deseadas.

Por otra parte, y como era de esperar, al adicionar fibras a una mezcla de mortero, la trabajabilidad se vio afectada, por lo que pensar en razones de agua cemento bajas o cercanas al teórico sin la incorporación de aditivos como reductores de agua o plastificantes descarta su potencial aplicación, además de dificultar la dispersión de las fibras de carbono.

Finalmente, con la información obtenida, el potencial que tienen las mezclas cementicias para ser incorporadas como elementos de calefacción podría ser viable, pues el requerimiento energético es bajo y se obtienen altas temperaturas, por lo que queda continuar el estudio modificando la morfología de las muestras a elaborar y confirmar los patrones registrados en nuestra investigación. Respecto a la adición de cuarzo en la mezcla, es evidente que existen cambios en el comportamiento de la distribución del calor, pero si consideramos el potencial uso que podría tener en una superficie, no pareciera que concentrar el calor en un sector sea la mejor alternativa, además que no existen grandes cambios los W/m^2 al comparar una misma dosificación elaborada con mortero corriente y otra que incorpora el cuarzo. La diferencia que se produce en el comportamiento observado en las probetas con 3% de adición de fibras de carbono respecto a las con 4% y 5% puede ser explicado por haber alcanzado el umbral de percolación - que corresponde a la fracción de volumen de fibra por encima del requerido para generar una camino de conducción debido al contacto entre fibras (Chung, 2005) - , lo que aumenta de forma abrupta la conductividad eléctrica (Chen y Chung, D., 1994), por ende, disminuye el Efecto Joule. Otra forma en que podríamos interpretar la diferencia que existe en cómo se distribuye el calor en la superficie de las probetas manteniendo prácticamente la misma potencia de radiación, es que la probeta libera la misma cantidad de calor, pero en puntos más concentrados (caso de las probetas con 3% y 5% con cuarzo), y que el cuarzo permite mediante sus mejores propiedades de conducción térmica disipar principalmente en esos puntos concentrados. Finalmente es posible concluir que la mejor combinación resultó ser con un 4% de fibras de carbono adicionadas y sin la adición de cuarzo en la mezcla para la elaboración del mortero.

5 Futuros pasos para la investigación

Toda nuestra investigación se realizó utilizando como muestras experimentales las probetas elaboradas, por lo que podemos definir que nuestras pruebas han sido a un nivel microexperimental. Para continuar con el estudio es necesario aumentar el tamaño de las muestras, es decir, realizar pruebas en superficies mayores, idealmente de 1 m² para determinar de forma más real y no estimativa la potencia de radiación que posee cada dosificación. De igual forma, teniendo muestras de mayor superficie se puede determinar la variación que hay en el requerimiento energético para generar calor y alcanzar las temperaturas logradas en las probetas utilizadas en nuestro estudio.

6 Bibliografía

Alcaide, J., (2007) *Caracterización de morteros con adición o sustitución de diferentes materiales carbonosos*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante, España.

Athanasopoulos N. y Kostopoulos V., (2012) *Resistive heating of multidirectional and unidirectional dry carbon fibre preforms*. University of Patras, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, Greece.

Corporación de Desarrollo Tecnológico, (2010) *Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial*. CDT, Chile.

Chen P.-W. y Chung D., (1994) *“Improving the Electrical Conductivity of Composites Comprised of Short Conducting Fibers in a Nonconducting Matrix: The Addition of a Nonconducting particulate Filler”* en Journal of Electronic Materials, 24(1), pp. 47-51.

Chung, D., (2000) *Cement-Matrix composites for thermal engineering*. State University of New York at Buffalo, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, USA.

Chung, D., (2005) *“Dispersion of Short Fibers in Cement”* en Journal of Materials in Civil Engineering. July-August, pp. 379-383.

INSTITUTO Nacional de Normalización (2007) *“Acondicionamiento térmico - Envolvente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas”*. NCH853: Of. 2007. Santiago, Chile.

INSTITUTO Nacional de Normalización (1967) *“Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento”*. NCH158: Of. 1967. Santiago, Chile.

Jobmann, M. y Bunterbarth G., (2009) *“Influence of graphite and quartz addition on the thermo-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste”* en Applied Clay Science, 44, pp. 206-210.

Márquez, M.; Miranda, R. y Aserta Consultores, (2012) *Una estimación de los impactos en los presupuestos familiares derivados del sostenido aumento en los precios de la energía*. IMAEC, Chile.

Servicio de Salud Metropolitano Norte, (2013) *Revista Mensual Agosto: Tu Salud, Nuestro Norte*, Ministerio de Salud, Chile.

Tuan Y., (2004) *Conductive concrete for bridge deck deicing and anti-icing*. University of Nebraska-Lincoln, Nebraska Department of Roads, USA.

Wang S., Wen S. y Chung, D, (2004) "*Resistance heating using electrically conductive cements*" en *Advances in Cement Research*. October. 16(4), pp. 161-166

7.2 Anexo B: Especificaciones técnicas de equipos utilizados

7.2.1 Especificaciones técnicas termómetro infrarrojo



DIGITAL LASER THERMOMETER UP TO 380 °C

Digital laser thermometer with a range of -50 °C to 380 °C and for accurately measuring fluids, gasses and all sorts of other substances. The laser beam allows you to measure remotely the temperature of any required object.

- Measure distance: -50 °C to 380 °C
- Reading / resolution: 0,1 °C
- Automatic "hold" function
- Display illumination
- Very fast reaction time (within 0.5 sec.)
- Incl. 1 battery, 9V
- Incl. carry case
- Measurements: 185 x 135 x 38 mm
- Weight: 178 grams
- Measurement distance: 1500 mm

7.2.2 Especificaciones técnicas Multímetro UNI-T UT33C



General Specifications

- Maximum Voltage (including transient overvoltage) between any Terminals and Grounding: 500V rms.
- Fused Protection for VwmA Input Terminal: 315mA, 250V fast type, $\phi 5 \times 20$ mm
- 10A Terminal: Un-fused.
- Range: Manual ranging
- Maximum Display: Display: 1999.
- Measurement Speed: Updates 2~3 times /second.
- Temperature:
 - Operating: $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ($32^{\circ}\text{F} \sim 104^{\circ}\text{F}$).
 - Storage: $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ($14^{\circ}\text{F} \sim 122^{\circ}\text{F}$).
- Relative Humidity: 75% @ $0^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$; $\leq 50\%$ @ $31 - 40^{\circ}\text{C}$.
- Altitude: Operating: 2000 m. Storage: 10000 m.
- Battery Type: One piece of 9V Battery NEDA 1604 or 6F22 or 006P.
- Battery Deficiency: Display:
- Negative reading: Display:
- Overloading: Display: 1.
- Dimensions (HxWxL): 130 x 73.5 x 35mm.
- Weight: Approx. 156g (battery included).
- Safety/Compliances: IEC61010 CAT.I 600V overvoltage and double insulation standard.
- Certification: CE

Accuracy Specification

Accuracy: (a% reading + b digits), guarantee for 1 year.
 Operating temperature: $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
 Relative humidity: <75%.
 Temperature coefficient: $0.1 \times$ (specified accuracy) / 1°C .

A. DC Voltage

Range	Resolution	Accuracy			Overload Protection
		UT33B	UT33C	UT33D	
200mV	100 μV	$\pm(0.5\%+2)$			250V DC or AC
2000mV	1mV				
20V	10mV				
200V	100mV	$\pm(0.8\%+2)$			500V DC or AC
500V	1V				

Remark: Input impedance: 10M Ω .

B. AC Voltage

Range	Resolution	Accuracy			Overload Protection
		UT33B	UT33C	UT33D	
200V	100mV	$\pm(1.2\%+10)$			500V DC or AC
500V	1V				

Remarks:

- Input impedance: approx. 5M Ω .
- Displays effective value of sine wave (mean value response).
- Frequency response 40Hz ~ 400Hz.

C. DC Current

Range	Resolution	Accuracy			Overload Protection
		UT33B	UT33C	UT33D	
200 μA	0.1 μA	$\pm(1\%+2)$	250V fast type fuse: 5x20mm	
2000 μA	1 μA	$\pm(1\%+2)$		
20mA	10 μA	$\pm(1.2\%+2)$			
200mA	100 μA				
10A	10mA	$\pm(2\%+5)$			Un-Fused

Remark:

1. At 10A Range: For continuous measurement ≤ 10 seconds and interval not less than 15 minutes.

D. Resistance

Range	Resolution	Accuracy			Overload Protection
		UT33B	UT33C	UT33D	
200 Ω	0.1 Ω	$\pm(0.8\%+5)$			250V DC or AC
2000 Ω	1 Ω				
20K Ω	10 Ω	$\pm(0.8\%+2)$			
200K Ω	100 Ω				
20M Ω	10K Ω	$\pm(1\%+5)$			
200M Ω	100K Ω				

E. Diodes and Continuity Measurement (Continuity test only for UT33C/UT33D)

Range	Resolution	Remark	Overload Protection
	1mV	Display approximate forward voltage drop: 0.5v~0.8v	250V DC or AC
	1 Ω	Buzzer beeps at <70W	

F. The Model UT33C: Temperature

Range	Resolution	Remark	Overload Protection
$-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$	1 $^{\circ}\text{C}$	$\pm(1\%+3)$	250V DC or AC
$150^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$		$\pm(1.5\%+15)$	
$-40^{\circ}\text{F} \sim 302^{\circ}\text{F}$	1 $^{\circ}\text{F}$	$\pm(1\%+4)$	
$302^{\circ}\text{F} \sim 1832^{\circ}\text{F}$		$\pm(1.5\%+15)$	

G. The Mode UT33B: Battery Test

Range	Resolution	Internal Resistance
12V	10mV	240 Ω
9V	10mV	1.8K Ω
1.5V	10mV	30 Ω

H. The Mode UT33D: Square Wave Output

Range	Illustration
OUT	Approx. output 50Hz square wave signal. As a simple signal source with 47K Ω resistance output.

7.2.3 Especificaciones técnicas cámara termográfica Juke serie TiR



Especificaciones generales

Temperatura

Operación	-10 °C a 50 °C (14 °F a 122 °F)
Temperatura de almacenamiento	de -20 °C a 50 °C (de -4 °F a 122 °F) sin baterías
Temperatura de carga	de 0 °C a 40 °C (de 32 °F a 104 °F)
Humedad relativa	10 al 90% sin condensación
Pantalla	LCD de 640 x 480 a color, aprox. 2" x 3" (orientación horizontal) con luz de fondo (Brillo o Auto seleccionables)

Controles y ajustes

Escala de temperatura seleccionable por el usuario (°C/°F)
Selección de idioma
Configuración de Hora/Fecha
Selección de emisividad (sólo para los modelos Ti25 y TiR1)
Hot Spot y Cold Spot seleccionables por el usuario en la imagen (sólo para los modelos TiR1 y Ti25)

Se incluye el software..... SmartView[®] de análisis completo y generación de informes

Potencia

Batería	Paquete de batería recargable (incluido)
Vida útil de la batería	3 a 4 horas de uso continuo (supone un 50 % de brillo en la pantalla LCD)
Tiempo de carga de la batería	2 horas para una carga completa con el adaptador de CA o el cargador de CC para automóviles
Operación/Carga con CA	Adaptador/cargador de CA (110 – 220 VCA, 50/60 Hz). Carga la batería mientras el procesador térmico de imágenes está en funcionamiento. Se incluyen adaptadores universales de red principal de CA.
Ahorro de potencia	Modo de reposo activado después de 5 minutos de inactividad Apagado automático después de 30 minutos de inactividad

Normas de seguridad

Directiva de la CE IEC/EN 61010-1 2^{da} Edición, grado de contaminación 2

Compatibilidad electromagnética

Directiva de EMC	EN61326-1
C Tick	IEC/EN 61326
US FCC	CFR 47, Parte 15 Clase A

Vibración..... 2 G, IEC 68-2-29

Choque..... 25 G, IEC 68-2-6

Caída..... 2 metros de caída, todos los lados

Procesadores térmicos de imágenes
Especificaciones detalladas

Tamaño (Alt x Anch x L)	10 pulg x 5 pulg x 6 pulg (25,4 cm x 12,7 cm x 15,2 cm)
Peso	1,1 kg (2,35 lb)
Clasificación de la caja	IP54
Garantía	2 años
Ciclo de calibración	2 años (supone una operación normal y un envejecimiento normal)
Idiomas admitidos	alemán, checo, chino simplificado, chino tradicional, coreano, español, finés, francés, inglés, italiano, japonés, polaco, portugués, ruso, sueco y turco

Especificaciones detalladas

Mediciones de temperatura

Rango de temperatura (no calibrada por debajo de -10 °C)

Modelos TiRx, TiR y TiR1	de -20 °C a +100 °C
Modelos Ti9 y Ti10	de -20 °C a +250 °C
Ti25	-20 °C a +350 °C

Precisión

Modelos Ti9, Ti10, TiRx y TiR	±5 °C o el 5 % (el que sea mayor).
TiR1 y Ti25	±2 °C o 2 % (el que sea mayor)
Modos de medición.....	Smooth Auto-Scaling y Manual Scaling

Corrección de la emisividad en la pantalla (sólo para los modelos Ti25 y TiR1)

Rendimiento de formación de imágenes

Campo de visión	23 ° x 17 °
Resolución espacial (IFOV)	2,5 mRad
Distancia mínima de enfoque	
Lente térmica	15 cm (aprox. 6 pulg.)
Lente de luz visible (visual)	46 cm (aprox. 18 pulg.)
Enfoque	Manual
Frecuencia de la imagen	9 Hz de velocidad de actualización
Tipo de detector	Arreglo de plano focal de 160 X 120, microbolómetro sin enfriamiento
Tipo de lente infrarrojo	20 mm EFL, lente F/0,8
Sensibilidad térmica (DTER)	
Modelos Ti9 y Ti10	≤0,2 °C a 30 °C (200 mK)
Ti25	≤0,1 °C a 30 °C (100 mK)
Modelos TiRx y TiR	≤0,1 °C a 30 °C (100 mK)
TiR1	≤0,07 °C a 30 °C (70 mK)
Banda espectral infrarroja.....	7,5 μm a 14 μm
Cámara visual.....	640 x 480 de resolución

Presentación de la imagen

Paletas

Modelos Ti9, Ti10, TiRx y TiR	acero, azul-rojo, contraste alto, gris
Modelos TiR1 y Ti25	acero, azul-rojo, contraste alto, ámbar, metal caliente, gris

Nivel y alcance

Smooth Auto-Scaling y Manual Scaling del nivel y del alcance

Minimum Span (en modo manual)

Modelos Ti9 y Ti10.....	5 °C
Modelos Ti25, TiRx, TiR y TiR1	2,5 °C

Intervalo mínimo (en modo automático)

Modelos Ti9 y Ti10.....	10 °C
Modelos Ti25, TiRx, TiR y TiR1	5 °C

Información de IR-Fusion® (sólo para los modelos Ti10, Ti25, TiR y TiR1)

Mezcla visual e IR (sólo para los modelos Ti25 y TiR1)

Imagen dentro de otra imagen (PIP)

Ti10 y TiR.....	100 % IR mostrado en el centro, 320 x 240 píxeles
Ti25 y TiR1	Tres niveles de mezcla IR en la pantalla mostrados en el centro, 320 x 240 píxeles

Pantalla completa (PIP desactivado)

Ti10 y TiR.....	100 % IR mostrado en la pantalla LCD de 640 x 480
Ti25 y TiR1	Tres niveles de mezcla IR en la pantalla mostrados en la pantalla LCD de 640 x 480

Los modelos Ti25 y TiR1 permiten al usuario ajustar la paleta, la mezcla alfa, el nivel, el alcance, el valor de PIP y la emisividad de una imagen capturada antes de almacenarla.

Anotación de voz	60 segundos de tiempo máximo de grabación por imagen (sólo para los modelos TiR1 y Ti25)
-------------------------------	--

Almacenamiento de imágenes y datos

Medio de almacenamiento	Tarjeta de memoria SD (una tarjeta de memoria de 2 GB almacenará al menos 1200 imágenes IR y visuales vinculadas completamente radiométricas (.is2), cada una con anotaciones de voz de 60 segundos, o 3000 imágenes IR básicas (.bmp))
Formatos de archivo.....	No radiométrico (.bmp) o completamente radiométrico (.is2) No se requiere software de análisis para los archivos no radiométricos (.bmp)
Formatos de archivo de exportación con software SmartView®	JPEG, JPG, JPE, JFIF, BMP, GIF, DIP, PNG, TIF y TIFF

7.3 Anexo C: Fotografías

7.3.1 Probetas con 3% de adición



Figura 10. Ejemplo de probetas con 3% de adición de fibras de carbono. A la izquierda variante con cuarzo y a la derecha la que incorpora solamente fibras de carbono

7.3.2 Probetas con 4% de adición



Figura 11. Ejemplo de probetas con 4% de adición de fibras de carbono. A la izquierda variante con cuarzo y a la derecha la que incorpora solamente fibras de carbono

7.3.3 Probetas con 5% de adición



Figura 12. Ejemplo de probetas con 5% de adición de fibras de carbono. A la derecha variante con cuarzo y a la izquierda la que incorpora solamente fibras de carbono